

## 利用单片非球面透镜实现激光束整形

李明伟,于晓晨,潘毅思,胡家升

(大连理工大学信息与通信工程学院,辽宁 大连 116024)

**摘要:**在非球面透镜组进行激光束整形的技术基础上,设计了应用于 TEA CO<sub>2</sub> 激光光束整形的单片非球面镜光束整形系统。基于几何光学原理,利用能量守恒定律和等光程条件进行系统理论模型求解。通过使用龙贝格数值积分和非线性最小二乘法,获得非球面透镜前后两面的矢高。最后,通过光学设计软件 ZEMAX 进行系统性能优化,并对其可加工性进行了分析。实验结果表明,出射光束的光程差(OPD)为  $\pm 0.01 \lambda$ ,峰谷值误差为  $0.0002 \lambda$ ,输出基本为平行光。该方法能有效避免双分离透镜结构系统的筒长过长、不易调节的弊端,使器件结构变得简单,便于加工装调。

**关键词:**激光光学;光束整形;非球面透镜;平顶光束

**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.09.08

## Laser beam shaping using single aspheric lens system

LI Ming-wei, YU Xiao-chen, PAN Yi-si, HU Jia-sheng

(School of Information and communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Based on the Galileo aspheric lens beam shaping system, a single aspheric lens beam shaping system for TEA CO<sub>2</sub> lasers is designed. The optical design is based on geometrical optics, and the differential equations expressing conservation are solved by using energy law and constant optical path length condition. By the Romberg numerical integrating algorithm and the method of the nonlinear least square, the sags of aspheric surfaces are obtained. The system's performance is optimized using the optical design software ZEMAX, and the simulation result shows that the optical path difference(OPD) of the flat-top output is  $\pm 0.01 \lambda$ , the peak-valley wavefront error is  $0.0002 \lambda$ , which proves it being collimated. The simpler system avoids the disadvantages of large volume and difficulty in adjustment of traditional Galileo system, and makes itself easy to process and adjust.

**Key words:** laser optics; beam shaping; aspheric lens; flat-top beam

### 1 引言

在许多激光技术的应用领域中,光束的质量直接影响激光器的应用水平。通常情况下,激光器输出的光束能量在空间上呈高斯分布(或者近似高斯分布)。在很多情况中,如表面热处理、激光材料加工、光学信息存储等领域都要求激光束能量呈均匀分布。将激光束从高斯分布转变成平顶分布的光束空间整形往往是借助于外加的光束整形系统完成的<sup>[1]</sup>。目前主要的激光束整形方法包括:非球面透镜组整形系统,微透镜阵列整形系统,衍射光学元

件,双折射透镜组,液晶空间光调制器等。本文主要探讨用非球面光学系统实现激光束整形。

Frieden<sup>[2]</sup>、Kreuzer<sup>[3]</sup>分别于1965年、1969年提出,对于能量分布具有轴对称性的激光光束,其外部轮廓可以通过具有非球面的双分离透镜组进行改

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 60877003);辽宁省高校重点实验室资助项目(No. LS2010037)资助。

**作者简介:**李明伟(1957-),男,教授,研究方向为光电技术及应用。E-mail: dlutcc@dlut.edu.cn

**收稿日期:** 2013-01-22

变,但基于当时光学加工技术水平的限制,加工高精度复杂非球面是非常困难的,甚至是不可能的。此后若干研究人员对这种方法做了一系列改进。Shafer<sup>[4]</sup>尝试利用双胶合球面镜代替透镜组中的非球面镜,但这种做法会影响输出光束质量。Hoffnagle和Jefferson<sup>[5]</sup>将透镜组换为平凸结构;Evans和Shealy<sup>[6]</sup>利用三个球面渐变折射率透镜组,都在一定程度上降低了整形系统的制作难度。随着科技的进步,Magneto rheological figuring(MRF)<sup>[7]</sup>技术的逐渐成熟,使得光学材料工件表面能在短时间内得到亚纳米级的表面粗糙度,且加工价格更为合理,加工精度基本能满足实际使用要求,为利用非球面透镜实现激光束整形提供了基本条件。

本文基于伽利略式非球面透镜组整形原理,利用能量守恒定律和等光程条件,推导了单片非球面透镜光束整形系统理论模型,并将其应用到对高功率TEA CO<sub>2</sub>激光器发出光束的整形中。在此基础上,采用光学设计软件ZEMAX对本文的设计进行优化,仿真实验结果表明,本设计方案可以达到预期整形目标。最后,结合目前的透镜加工工艺水平,分析了设计结果的实际可加工性,证明在允许误差范围内,该系统仍可达到较好的整形结果。

### 2 整形系统设计原理

在伽利略式非球面透镜组整形系统中,第一片非球面透镜调整能量空间分布,使光强在到达特定位置(第二片透镜处)呈平顶分布;第二片非球面镜对光束再准直,以便使光线能够沿直线传播到无穷远。为减小整形系统筒长,降低加工和装调难度,本文利用单片非球面透镜前后表面分别代替双透镜系统的前后两片透镜,来实现对光束的匀化和准直,透镜结构如图1所示。

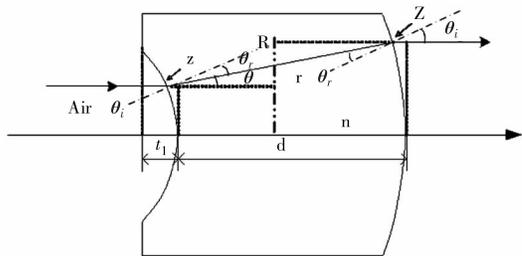


图1 单片非球面透镜整形系统

Fig.1 laser beam shaping system with single aspheric lens

对于具有轴对称特性的输入光束,遵守能量守恒

原理,即输入光束的能量完全转化成输出光束的能量。如图1所示,任意光线入射到整形系统时与光轴距离为r,光强为I<sub>in</sub>(r),出射时与光轴距离为R,光强变为I<sub>out</sub>(R)。

基于能量守恒原理,有:

$$\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^r I_{in}(r) r dr = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^R I_{out}(R) r dR \quad (1)$$

若输入光束为基模高斯光束,归一化后 I<sub>in</sub>(r) = exp[-2(r/r<sub>0</sub>)<sup>2</sup>] (2)

其中 r<sub>0</sub> 为高斯光束束腰。

要求输出光束均匀分布,即光强 I<sub>out</sub>(R) 为常数,则:

$$R = \left\{ \frac{r_0^2}{2I_{out}} [1 - \exp(-2r^2/r_0^2)] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

其中, I<sub>out</sub> =  $\frac{r_0^2}{2R_{max}^2} [1 - \exp(-2r_{max}^2/r_0^2)]$  (4)

上式中,r<sub>max</sub>是系统的入射光束最大半径,R<sub>max</sub>是出射面对应的光束最大半径,出射光束半径R决定了系统折射表面的形状。

如图2所示,有:

$$\tan\theta = \frac{R(r) - r}{Z(R) - z(r)} \quad (5)$$

另外,非球面s矢高的导数:

$$z'(r) = \frac{dz(r)}{dr} = \tan\theta_i \quad (6)$$

将式(6)代入折射定律 sinθ<sub>i</sub> = n sinθ<sub>r</sub>, 可得到:

$$\tan\theta_r = \frac{z'}{\sqrt{n^2 - z'^2}} \quad (7)$$

进一步推导出:

$$\begin{aligned} \tan\theta &= \tan(\theta_i - \theta_r) = \frac{z' \sqrt{n^2 - z'^2} - z'}{\sqrt{n^2 - z'^2} + z'} \\ &= \frac{R(r) - r}{Z(R) - z(r)} \end{aligned} \quad (8)$$

进而求解:

$$z' = \frac{-n^2(R-r)(Z-z) \pm n(R-r) \sqrt{(Z-z)^2 + (R-r)^2}}{(n^2 - 1)(Z-z)^2 - (R-r)^2} \quad (9)$$

通过光轴的光线的光程为:

$$(OPL)_0 = t_1 + nd \quad (10)$$

对于高度为r的任意光线光程为:

$$(OPL)_r = t_1 + z + n [(R-r)^2 + (Z-z)^2]^{1/2} + d - Z \quad (11)$$

根据等光程条件  $(OPL)_0 = (OPL)_r$ , 得到:

$$n[(R-r)^2 + (Z-z)^2]^{1/2} = d(n-1) + Z-z \quad (12)$$

最后解得:

$$(Z-z) = \frac{(1-n)d + n[(1-n)^2 d^2 + (1-n^2)(R-r)^2]^{1/2}}{1-n^2} \quad (13)$$

所以, 只需给出基本的系统参数  $n, t_1, d$ , 即可得到非球面参数  $R(r), z(r), Z(r)$ 。

### 3 整形系统模拟与分析

#### 3.1 基本参数选择

本文以波长为  $10.6 \mu\text{m}$  的  $\text{CO}_2$  激光器出射光束为整形对象。在进行实际整形系统的设计前, 首先需要确定单片非球面透镜的厚度及透镜的材料。由于单片透镜整形系统的筒长远小于双片结构, 与双片结构相比, 单片结构中光线在经过第一个折射面后, 其偏折角度较大。因此, 为保证非球面镜各区域曲率半径在合理范围内, 本文选择的透镜稍厚一些, 这里取  $d = 20 \text{ mm}$ 。对于透镜材料的选择, 考虑的两项指标为: 透过率和折射率。由于高功率  $\text{CO}_2$  激光器的波长处在红外波段, 考虑到能量吸收率, 透镜材料选择热吸收系数较小的  $\text{ZnSe}$ 。当波长为  $10.6 \mu\text{m}$  时,  $\text{ZnSe}$  的折射率为  $2.402662$ 。

#### 3.2 矢高的计算和拟合

将初始参数代入到前文推导的公式中, 可以得到透镜前后表面矢高与透镜半径之间的关系数据组  $[(z, r)$  和  $(Z, R)]$ , 如图 2 所示。这里采用龙贝格积分法<sup>[8]</sup>, 并在 Matlab 中进行求解, 计算精度可达  $e^{-10} \text{ m}$ 。

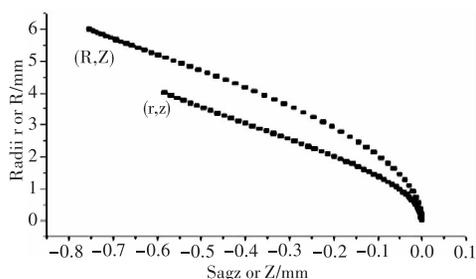


图 2 非球面表面矢高与透镜半径之间的关系

Fig. 2 the relation of sags of aspheric surfaces and the radii of the lens

采用非线性拟合法对数据进行拟合, 并将其表示为常用的光学表面公式。本文选择非线性最小二乘法把数据拟合成奇次非球面公式。

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + \sum_{i=1}^n A_i r^i \quad (14)$$

采用均方差 (RMSE), 残差平方和 (SSE) 来评价拟合结果。前后两面 RMSE 值分别为  $1.674706715 \text{E}^{-8}$ ,  $7.149022781 \text{E}^{-8}$ , SSE 值分别为  $1.430367717 \text{E}^{-14}$ ,  $2.606534863 \text{E}^{-13}$ 。

理论上, 拟合多项式高次项越多拟合的精度会越高, 但在实际生产中, 考虑到元件的可加工性, 应尽量减少高次项。因此, 在对拟合精度和加工难度做权衡后, 本文给出了既能得到良好光学性能, 又较易加工的单片非球面透镜参数, 包括一个二次曲面项和 8 个非球面项, 见表 1。

表 1 表 1  $\text{CO}_2$  激光外形整形系统面型参数

Tab. 1 surface parameters of a  $\text{CO}_2$  ( $10.6 \mu\text{m}$ ) laser beam shaping system

parameters	The first surface	The second surface
$1/c$	2.5882172597	111.554977149
$k$	-1.406506981	284.897447407
$A_1$	$1.6737944019 \text{E}^{-6}$	$-2.3161494013 \text{E}^{-6}$
$A_2$	-0.24806604101	-0.0285211606
$A_3$	$4.5546818818 \text{E}^{-5}$	$-2.3460181432 \text{E}^{-5}$
$A_4$	0.0042395943	$3.98632124199 \text{E}^{-5}$
$A_5$	$8.4118192161 \text{E}^{-5}$	$-1.0015628759 \text{E}^{-5}$
$A_6$	-0.000154137	$3.01463482248 \text{E}^{-6}$
$A_7$	$2.0096341390 \text{E}^{-5}$	$-3.9843938438 \text{E}^{-7}$
$A_8$	$-8.705294083 \text{E}^{-7}$	$2.76727890489 \text{E}^{-8}$

#### 3.3 性能分析与优化

由于  $\text{ZnSe}$  基片和非球面加工费用较高, 为了避免设计中的缺陷, 需要对设计的系统进行仿真研究。将表中非球面结构参量连同初始条件输入到 ZEMAX 中, 利用物理光学传播功能进行分析。OPD =  $\pm 0.2 \lambda$ , 波前峰谷值为  $0.1196 \lambda$ 。将仿真结果运用 ZEMAX 软件的优化功能进行优化。将前后两面的曲率半径  $1/C$ , 圆锥系数  $k$  及 8 个非球面项参数设为变量, 光束波前的均方根误差为评价函数重复进行优化, 直至评价函数不再明显改变。

最终优化所得结果如下: OPD 为  $\pm 0.01 \lambda$ , 波前峰谷值达  $0.0002 \lambda$ 。本文  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ , OPD 的绝对值约为  $106 \text{ nm}$ , 波前峰谷值为  $2.12 \text{ nm}$ 。输入输出

光束如图3所示,可以看出出射光束几乎是平顶光束,达到了整形目的。输出光束的边缘略有突起,通过加高次项可以减缓效果,但会同时增加加工难度。若用于对光束直径要求小的情况,则边缘突起的现象可以得到避免。

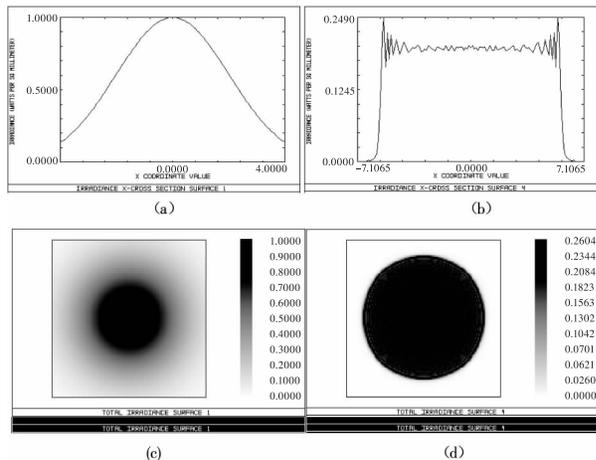


图3 光束强度 X 剖面图(a)入射高斯光束,(b)出射光束; 光束能量分布灰度图(c)入射高斯光束,(d)出射光束  
Fig.3 X-cross of beam irradiance(a)input Gaussian beam (b)output beam the gray scale of beam energy distribution (c)input Gaussian beam(d)output beam

#### 4 可加工性研究

由于本文主要讨论二氧化碳激光光束的整形,而该激光器发出的激光束波长较长,为 10.6 μm,相对可见光而言,要求光学元件的精度较低。目前金刚石车削技术<sup>[9]</sup>可以加工出直径 120 mm 以下的光学零件,面形精度达 0.5 ~ 11 μm,表面粗糙度值为 0.02 ~ 0.06 μm。应用 ELID 技术加工光学非球面

透镜,面形精度可达 0.2 μm,表面粗糙度 Ra 达 20 nm。尹韶辉等提出结合 MRF 与 ELID 磨削的组合工艺对各种光学材料进行超精密加工的方法<sup>[10]</sup>,该工艺可以在短时间内得到亚纳米级的表面粗糙度和峰谷值为 λ/20 nm 的形状精度,能满足非球面整形元件的精度要求。

ZnSe 属脆性材料,车削加工时容易形成崩碎切削,引起加工表面裂纹。但根据刘少凤等通过对脆性材料切削机理的研究可知<sup>[11]</sup>:若对切削量及刀具几何参数进行合理选择,可保持以韧性切削完成工序,在特定条件下,工件表面粗糙度可达 Ra9 nm,实现了镜面切削。考虑到实际加工过程中面形误差不可避免,根据文献<sup>[12]</sup>提到的误差模式,在 ZEMAX 中模拟了面形误差在 ±5% 范围处输出光束强度效果图,如图4所示。与计算机设计的原始结果(图3)非常接近,由此证明该元件具有较好的可加工性。

#### 5 结论

本文运用几何光学原理,设计了单片非球面光学系统实现对高斯光束的整形。通过对激光光束整形系统的分析和性能测试,证明单片非球面透镜可以有效地将具有轴对称性的激光光束整形形成等强度光束。相比于传统双分离式非球面镜整形系统,单透镜筒长短、制作成本降低、使用安装更加方便。通过对设计的可加工性进行论证,说明现有加工条件可以满足本设计的加工要求,为激光光束的整形提供了一种新的可行的解决方案。

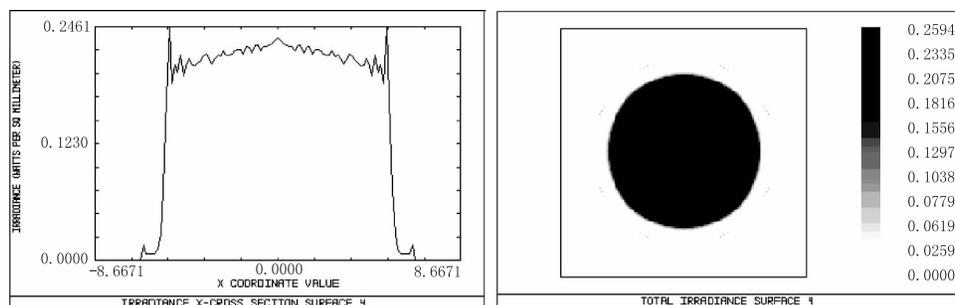


图4 存在面形误差的整形系统输出光束(a)x轴剖面图(b)能量分布

Fig.4 output beam obtained by technically designed result with surface error(a)x-cross radiance(b) energy distribution

#### 参考文献:

[1] Pan Y Y, Cui R Zh, Chen G, et al. Beam-shaping technique for laser diode bars with prism group [J]. Laser Technology, 2006, 30(4) :370 - 372.

[2] B R Frieden. Lossless conversion of a plane laser wave to a plane wave of uniform irradiance [J]. Appl Opt, 1965, 4 (11) :1400 - 1403.  
[3] J L Kreuzer. Coherent light optical system yielding an output beam of desired intensity distribution at a desired

- equiphase surface[J]. U. S. Patent, 1969, 3:476 - 463.
- [4] D Shafer. Gaussian to flat-top intensity distribution lens [J]. Opt. Laser Technol, 1982, 14: 159 - 160.
- [5] J A Hoffnagle, C M Jefferson. Design and performance of a refractive optical system that converts gaussian to flattop beam[J]. Appl. Opt, 2000, 39: 5488 - 5499.
- [6] N C Evans, D L Shealy. Design and optimization of an irradiance profile - shaping system with a genetic algorithm method[J]. Appl. Opt. , 1998, 37: 5216 - 5221.
- [7] D Golini, W I Kordonski, P Dumas, et al. Magnetorheological finishing(MRF) in commercial precision optics manufacturing[J]. Proc. SPIE, 1999, 3782: 80 - 91.
- [8] Li Dianjun, Liang Siyuan, Cao Jianjian. Spatial laser beam shaping using aspheric Galilean beam expansion system [J]. Laser Technology, 2008, 32(4): 427 - 429. (in Chinese)  
李殿军, 梁思远, 曹建建. 非球面伽利略扩束系统实现激光束空间整形[J]. 激光技术, 2008, 32(4): 427 - 429.
- [9] Jia Shikui, Li Chenggui, et al. Aspheric surface manufacture method of glass material[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2007, 43(5): 14 - 15. (in Chinese)  
贾世奎, 李成贵, 等. 玻璃材料非球面的加工方法[J]. 航空精密制造技术, 2007, 43(5): 14 - 15.
- [10] Yin Shaohui, Ohmori Hitoshi, Lin Weimin, et al. A High efficient ultra - precision synergistic finishing process for optical materials[J]. China Mechanic Engineering. 2008, 19(21): 2540 - 2544. (in Chinese)  
尹韶辉, 大森整, 林伟民, 等. 一种光学材料高效超精密加工方法[J]. 中国机械工程, 2008, 19(21): 2540 - 2544.
- [11] Liu Shaofeng, Zhou Zhixiong, Yang Jun, et al. Experimental study on surface roughness of turning crystal material [J]. Machine tool and Hydraulics, 2000, 2: 17 - 18. (in Chinese)  
刘少凤, 周志雄, 杨军, 等. 晶体材料车削表面粗糙度的实验研究[J]. 机床与液压, 2000, 2: 17 - 18.
- [12] Wu Dongliang, Dai Yifan, Wang Guilin, et al. Influence of optical surface error on encircled energy [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(9): 1328 - 1335. (in Chinese)  
吴冬良, 戴一帆, 王贵林, 等. 光学面形误差对环围能量比的影响[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1328 - 1335.